

называют также *шкалой Кельвина*. Кельвин впервые предложил эту шкалу в 1848 г. С ней мы подробно познакомимся в § 31.

Абсолютная термодинамическая шкала является *основной температурной шкалой* в физике. Там, где пригоден газовый термометр, эта шкала практически не отличается от идеально-газовой шкалы температур. Поэтому в интервале от 4 до 1338 К (точка затвердевания золота) абсолютная термодинамическая шкала практически осуществляется с помощью газового термометра.

ЗАДАЧА

Газовый термометр постоянного объема наполнен неидеальным газом, уравнение состояния которого имеет вид $P + \pi(V) = \phi(V) T$, где $\pi(V)$ и $\phi(V)$ — произвольные функции объема, а T — температура по шкале идеально-газового термометра. Термометр градуируется обычным способом по двум реперным точкам. Показать, что его показания будут совпадать с показаниями такого же термометра, наполненного идеальным газом, если только температуры реперных точек в обоих случаях выбраны одинаковыми.

§ 5. Виды термометров

1. Среди различных термометров вне конкуренции по чувствительности, точности измерений и воспроизводимости стоит *газовый термометр*, в котором индикатором температуры является *давление газа* при постоянном объеме резервуара термометра. Шкала газового термометра почти точно совпадает с абсолютной термодинамической шкалой Кельвина, что является большим достоинством термометра. Однако устройство газового термометра и работа с ним довольно сложны — термометры имеют большие размеры, громоздки и медленно приходят в состояние теплового равновесия. По этим причинам для технических целей газовые термометры применяются редко. Они довольно редко используются и в физических исследованиях, где с их помощью иногда измеряются низкие температуры. Основное назначение газовых термометров состоит в том, что по ним градуируются другие термометры. В этой связи газовые термометры называются *первичными*, а градуированные по ним термометры, применяющиеся при практических измерениях, — *вторичными*. Не каждый вторичный термометр должен градуироваться непременно по газовому термометру. Газовые термометры используются для градуировки главным образом в бюро стандартов, метрологических институтах и в некоторых исследовательских лабораториях. Обычно же для градуировки термометров применяются достаточно точные вторичные термометры, уже проградуированные по газовому.

Из вторичных термометров наибольшее значение имеют *жидкостные* (главным образом ртутные) *термометры*, *термометры сопротивления* и *термоэлементы*.

2. Устройство жидкостных термометров общеизвестно, и нет необходимости подробно останавливаться на этом вопросе. Жидкостные термометры не отличаются большой точностью. По этой и ряду других причин они не всегда пригодны для физических исследований. Область их применения ограничена со стороны низких температур свойствами жидкостей, а со стороны высоких температур — свойствами стекла: при понижении температуры все жидкости замерзают, при высоких температурах стекло размягчается. Все же жидкостные термометры могут применяться в довольно широкой области температур — примерно от -200°C до $+600^{\circ}\text{C}$. Наиболее употребительными жидкостями, применяемыми в жидкостных термометрах, являются: 1) пентан (область температур от -200 до $+20^{\circ}\text{C}$), 2) этиловый спирт (от -110 до $+50^{\circ}\text{C}$), 3) толуол (от -70 до $+100^{\circ}\text{C}$), 4) ртуть (от $-38,86$ до 600°C). Самыми распространенными являются ртутные термометры. Температура кипения ртути при нормальном атмосферном давлении равна 357°C . При повышении давления она повышается (при давлении в 4 атм до 450°C , а при давлении в 30 атм — до 500°C). Поэтому для измерения температур выше 357°C необходимо, чтобы ртуть в капилляре термометра находилась под давлением выше атмосферного. С этой целью капилляр заполняют газом. Давление газа может доходить до 70 атм. Чтобы выдержать такое давление, стенки капилляра должны быть толстыми. Шкала наносится на стенках самого капилляра путем травления. Другие жидкости, применяемые в термометрах, отличаются от ртути прежде всего тем, что они смачивают стенки капилляра. В таких термометрах для предотвращения разрыва столбика жидкости капилляр должен наполняться газом всегда, а не только для измерения высоких температур.

3. В термометрах сопротивления термометрическим телом является проволока обычно из чистого металла, а иногда сплава; термометрической величиной служит ее электрическое сопротивление. Электрическое сопротивление металлов возрастает с повышением температуры. Отношение увеличения сопротивления при нагревании на один градус к сопротивлению при 0°C называется температурным коэффициентом сопротивления. Для большинства чистых металлов (вблизи комнатной температуры) этот коэффициент равен примерно 0,4%. Линейная зависимость сопротивления металлов от температуры соблюдается только приближенно. Отступления от нее особенно отчетливо проявляются при низких температурах. Поэтому термометры сопротивления имеют нелинейную шкалу и нуждаются в градуировке по газовому термометру.

Наиболее употребительными металлами для термометров сопротивления являются чистые платина и медь. Платиновый термометр применяется в интервале температур примерно от 10 до 1100°C , медный — от температур жидкого водорода приблизительно до 120°C . Точность термометров сопротивления в различных темпе-

ратурных интервалах разная. Для платинового термометра (в интервале температур от 20 до 70 К) она составляет около 0,01 К, а при измерении малых разностей температур — 0,001 К. Точность измерения температур медным термометром примерно на порядок меньше. В термометрах сопротивления применяются и другие материалы, например никель (ниже точки Кюри, т. е. 376 °С), а также сплав железа с никелем (около 70% никеля и 30% железа) — ниже 0° до 600 °С. Для измерения низких температур (от 3,4 до 273 К) может использоваться термометр сопротивления из чистого индия.

Конструкция термометра сопротивления может быть весьма разнообразной в зависимости от его предназначения. Платиновый термометр обычно изготавливается из тонкой платиновой проволоки (диаметром 0,05—0,1 мм с сопротивлением при комнатной температуре 10—100 Ом), закрепляемой на изоляционном каркасе из слюды (в технических термометрах), фарфора или кварца. Концы проволоки соединяются медными проводами с измерительной схемой сопротивления, например с мостиком Уитстона (1802—1875).

4. Особым видом термометров сопротивления являются *полупроводниковые термометры*, называемые также *термосопротивлениями* или *термисторами*. В них термометрическим телом служит полупроводник, например уголь или кристаллик германия. Угольные и германиевые термометры сопротивления применяются при температурах ниже 20 К. Сопротивление полупроводников убывает с повышением температуры. Их удельное сопротивление в десятки и сотни раз больше, чем у металлов. Температурный коэффициент сопротивления примерно также в 10 раз больше. Благодаря этому полупроводниковые термометры сопротивления при большой чувствительности могут иметь исключительно малые размеры. Такими термометрами можно надежно измерять изменения температуры в тысячные доли градуса.

5. Многие металлы и сплавы вблизи абсолютного нуля переходят из *нормального* в *сверхпроводящее* состояние, в котором их электрическое сопротивление обращается в нуль. Этот переход, однако, происходит настолько круто, что делает невозможным использование соответствующих материалов для устройства термометров сопротивления. Некоторое распространение в низкотемпературной термометрии получил термометр сопротивления из фосфористой бронзы, содержащей в качестве примеси несколько сотых процента свинца. Здесь переход из нормального в сверхпроводящее состояние сильно растянут. Сопротивление падает почти линейно в температурном интервале от 7 до 1 К.

6. О принципе устройства термопарных термометров уже говорилось выше. Термопарный термометр состоит из двух проволок *A* и *B*, изготовленных из разнородных материалов и сваренных своими концами (см. рис. 1). Если спаи имеют разные температуры, то в цепи термопары возникает электрический ток. Один из спаев,

называемый *спаем сравнения*, поддерживается при постоянной температуре, например, погружается в тающий лед. Эта температура называется *опорной температурой*. Другой спай, называемый *измерительным*, приводится в тепловой контакт с телом, температуру которого надо измерить. В цепь термопары включается *милливольтметр* для измерения возникающей э. д. с. По величине э. д. с. судят о температуре рассматриваемого тела. Градуировка может быть выполнена, например, с помощью газового термометра. При малой разности температур между спаями термо- э. д. с. пропорциональна этой разности.

Принципиальная схема включения термопары показана на рис. 4. Разнородные проволоки термопары *A* и *B* изображены жирной и двойными линиями, медные провода *C*, идущие к милли-

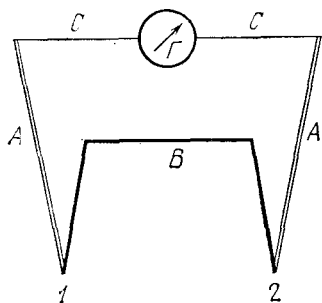


Рис. 4.

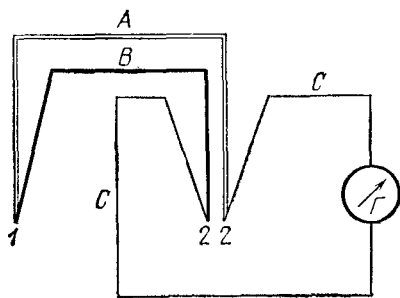


Рис. 5.

вольтметру, — тонкими линиями. Любой из спаев 1 или 2 может быть использован в качестве измерительного или спая сравнения. Необходимо, чтобы спай проволок *A* и *B* с концами медных проводов *C*, а также места соединения последних с милливольтметром имели одинаковые температуры, так как в противном случае в цепи может появиться дополнительный термоэлектрический ток, искажающий показания приборов. На рис. 5 приведена более совершенная схема включения термопарного термометра. Спай сравнения 2,2 в сущности состоит из двух спаев: металла *A* с медью и металла *B* с медью. Эти два спая поддерживаются при любой желаемой постоянной температуре.

Термопары изготавливаются как из благородных, так и неблагородных металлов. К последним относятся:

- 1) медь-константановая термопара (применяется примерно от -200 до $+350$ °C);
 - 2) железоконстантановая термопара (от 0 примерно до 750 °C);
 - 3) хромель-алюмелевая термопара (от -200 до 1100 °C);
 - 4) хромель-константановая термопара (от 20 К до 1000 °C).
- (Сплав хромель содержит 90% Ni и 10% Cr; алюмель — около 94% Ni, 3% Mn, 2% Al и 1% Si).

К термопарам из благородных металлов относятся:

- 1) платинородиевая термопара (до 1400—1600 °С);
- 2) платиноиридиевая термопара (до 1500 °С);
- 3) иридийродиевая термопара (до 2200 °С).

Особенно важное значение имеет платинородиевая термопара. В этой термопаре один из проводников изготавливается из чистой платины, а другой — из сплава 90% платины и 10% родия. Применяются также термопары, оба проводника которых изготовлены из указанного сплава, но с различным содержанием платины и родия. Для измерения очень высоких температур (до 2600—3000 °С) применяется вольфраморениевая термопара.

При соответствующем выборе материала термопары могут обеспечить измерения в широком диапазоне температур (начиная приблизительно от 4 и почти до 3000 К) с высокой точностью (в некоторых случаях до $\pm 0,01$ °С) и высокой чувствительностью (до 100 мкВ/°С для металлических и нескольких мкВ/°С для полупроводниковых термопар). Они являются идеальными приборами для измерения относительно небольших разностей температур, которые в отдельных случаях могут быть найдены с точностью до $\pm 0,001$ °С. Среди прочих достоинств термопары надо отметить простоту изготовления, малую теплоемкость и малое время установления температурного равновесия. Недостатком термопары является малая величина термо-э. д. с. при низких температурах. Термо-э. д. с. уменьшается с понижением температуры и обращается в нуль при абсолютном нуле. Вместе с ней уменьшается и чувствительность термопарного термометра. Так, например, чувствительность наиболее часто применяемой в низкотемпературной области медь-константановой термопары составляет при комнатной температуре около 40, при 90 К — около 17, а при 20 К — всего 5 микровольт на кельвин.

7. Измерение очень высоких температур — тысячи градусов и выше — наталкивается на ту очевидную трудность, что не существует тугоплавких термометров, выдерживающих такие температуры. При достаточно высоких температурах все тела плавятся. О температуре тел в этих случаях судят по испускаемому ими излучению. Роль термометрического тела играет само излучающее тело, а термометрической величины — *интенсивность испускаемого ими излучения*. Приборы, работающие на этом принципе, называются *пирометрами*. Их устройство основано, таким образом, на *законах лучеиспускания* нагретых тел. Эти законы будут изложены в отделе оптики нашего курса.

8. Измерение очень низких температур (ниже 1 К) также наталкивается на большие трудности. В этих случаях тепловой контакт термометра с охлаждаемым телом длительное время не приводит к установлению теплового равновесия между ними. Кроме того, многие термометрические величины, употребляемые при измерении

обычных температур, становятся непригодными в области очень низких температур: давление газа становится неизмеримо малым, сопротивление перестает зависеть от температуры и т. п. Поэтому здесь о температуре охлаждаемого тела судят по изменению физических свойств самого тела, например магнитных. Однако на этом пути возникают серьезные и еще не совсем преодоленные трудности, связанные с согласованием измеряемой таким образом температуры с термодинамической шкалой температур.

§ 6. Международная практическая температурная шкала

Экспериментальные трудности измерения температуры по абсолютной термодинамической шкале привели к необходимости введения *Международной практической температурной шкалы* (МПТШ). При этом преследовалась цель создания такой температурной шкалы, которую легко и быстро можно было бы использовать для калибровки научных и технических приборов и которая в то же время воспроизводила бы термодинамическую шкалу с наибольшей возможной точностью, допускаемой современной техникой измерений. Единицами температуры в этой шкале являются кельвин и градус Цельсия в зависимости от выбора начала отсчета температуры. Шкала несколько раз уточнялась. Последний раз это было сделано в 1968 г.

Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68) основана на одиннадцати хорошо воспроизводимых температурных точках, которым приписаны определенные значения температуры (*первичные реперные точки*). Температуры первичных реперных точек приведены в табл. I. Между первичными реперными точками температурная шкала устанавливается с помощью *интерполяционных формул*, дающих соотношения между температурой и показаниями стандартных термометров (платиновый термометр, платинородиевая термопара, оптический пирометр), градуированных по этим точкам. Вся область температур, охватываемая Международной практической шкалой — 68, делится на ряд интервалов, в каждом из которых рекомендуются свои методы воспроизведения температур и свои интерполяционные формулы.

В интервале от 13,81 К (тройная точка водорода) до 630,74 °С (точка затвердевания сурьмы) стандартным прибором является платиновый термометр сопротивления. Весь этот интервал разбивается на пять более мелких интервалов, в каждом из которых для платинового термометра применяются свои интерполяционные формулы. (Мы не приводим их, так как они занимают довольно много места.)

Выше температуры 630,74 °С до температуры затвердевания золота (1064 °С) Международная практическая температурная шкала устанавливается с помощью платинородиевой термопары